

## 铝对秋葵、小麦种子萌发和幼苗生长的影响\*

孙冬花<sup>1,2</sup>, 田秋英<sup>2</sup>, 张文浩<sup>2\*\*</sup>

(1 北京林业大学园林学院, 北京 100083; 2 中国科学院植物研究所光合与环境分子生理学重点实验室, 北京 100093)

**摘要:** 以不同抗铝小麦 (*Triticum aestivum L.*) 基因型: Carazinho (抗铝型) 和 Egret (铝敏感型) 为参比, 研究了铝胁迫对秋葵 (*Hibiscus moscheutos L.*) 种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明: 秋葵和小麦种子的萌发对铝胁迫不敏感; 高浓度的  $\text{AlCl}_3$  (50  $\mu\text{mol/L}$ ) 显著抑制主根和侧根伸长, 但对侧根数目影响较小; 两种植物的主根伸长对铝胁迫的差异不显著, 而秋葵侧根对铝毒的抗性比两个供试的小麦基因型强; 50  $\mu\text{mol/L}$  的  $\text{AlCl}_3$  显著降低两个小麦基因型的根系生物量, 但秋葵的根系生物量与对照比变化不大。表明秋葵幼苗的抗铝性强于两个小麦品种, 铝对秋葵、小麦侧根和主根的生长影响不同。

**关键词:** 秋葵; 铝毒; 种子萌发; 根伸长; 小麦

中图分类号: Q 945

文献标识码: A

文章编号: 0253 - 2700(2006)05 - 523 - 06

## The Effects of Aluminium on the Seed Germination and Seedling Growth in *Hibiscus moscheutos* (Malvaceae) and Wheat (*Triticum aestivum*, Gramineae)

SUN Dong-Hua<sup>1,2</sup>, TIAN Qiu-Ying<sup>2</sup>, ZHANG Wen-Hao<sup>2\*\*</sup>

(1 College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2 Key Laboratory of Photosynthesis & Environmental Molecular Physiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

**Abstract:** The effects of  $\text{AlCl}_3$  on *Hibiscus moscheutos* seed germination and growth were investigated to evaluate its hardness to Aluminum (Al), in comparison with Carazinho, a wheat genotype tolerant to Al, and Egret, a genotype sensitive to Al. For *H. moscheutos* and two wheat genotypes, our results indicated that germination was insensitive to  $\text{AlCl}_3$  until at 500  $\mu\text{mol/L}$ .  $\text{AlCl}_3$  of 50  $\mu\text{mol/L}$  inhibited the elongation of primary and lateral roots significantly, but had less effect on the number of lateral roots. There was no difference of root elongation between the *H. moscheutos* and wheat, but the lateral roots of *H. moscheutos* were more tolerant to Al than that of wheat genotypes. Under  $\text{AlCl}_3$  of 50  $\mu\text{mol/L}$  the reduction of root biomass was significant in wheat genotypes, but not in *H. moscheutos*, comparing to their control, suggesting that *H. moscheutos* is more tolerant to Al than the two wheat genotypes, and that Al has different effects on the growth of primary and lateral roots in both *H. moscheutos* and wheat.

**Key words:** *Hibiscus moscheutos*; Aluminium toxicity; Seed germination; Root elongation; *Triticum aestivum*

铝在碱性及中性 (pH 5.5) 土壤环境中, 以结合态存在, 对植物不具毒害。但当土壤呈酸性时 (pH<5.5), 化合态的铝将以离子态溶出,

对植物造成毒害。铝毒是酸性土壤中植物生长发育的主要限制因子。研究表明, 由于酸雨的频繁沉降及环境的不断恶化, 使得酸性土壤面积及土

\* 基金项目: 中国科学院“百人计划”项目资助

\*\* 通讯作者: Author for correspondence. E-mail: whzhang@ibcas.ac.cn Tel: (010) 62836697

收稿日期: 2006-03-15, 2006-08-10 接受发表

作者简介: 孙冬花 (1969-) 女, 在职硕士研究生, 主要从事植物营养生理方面的研究。Tel: (010) 62836131

壤中的离子态铝含量不断增加(刘厚田和田仁生, 1992), 铝毒已成为制约我国农业和林木生产的重要因素之一。植物遭受铝毒害时最明显的症状是根系生长受到抑制(Horst等, 1992; Sivaguru等, 1999), 根尖是铝毒的主要作用部位(Ryan等, 1993)。虽然大量的研究已表明, 铝毒能改变植物的许多生理生化过程, 例如, 植物根系水分养分的吸收、细胞骨架的动态变化和细胞的钙信号转导等(Matsumoto, 2000; Rengel and Zhang, 2003), 但植物铝毒的主要机制仍然不清楚。目前关于铝对根系生长影响的研究主要集中于对主根伸长的研究(Horst等, 1992; Blancaflor等, 1998; Sivaguru等, 1999), 对于侧根发育及侧根伸长的影响报道不多; 铝毒对影响植物种子萌发的研究也报道较少。

现今对铝毒的研究多以农作物(张芬琴和于金兰, 1999; 刘鹏等, 2003; 李朝苏等, 2005)、树木(Nosko等, 1988)及果蔬(黄邦全等, 2001)为研究对象, 对花卉植物的耐铝性研究报道较少。在城市绿化、美化日益受到重视的今天, 以园林花卉为试验材料, 研究其对铝毒胁迫的耐受性显得尤为重要。秋葵学名芙蓉葵(*Hibiscus moscheutos L.*), 属锦葵科(Malvaceae), 木槿属(*Hibiscus*), 是一种具较高观赏价值的园林花卉植物, 并可以食用(冯国楣等, 1984; 胡小泓, 2004)。研究秋葵的耐铝性一方面可为其栽培提供理论依据与技术支撑, 另一方面可为筛选耐铝毒园艺植物提供一些基础资料。鉴于人们对小麦的抗铝性及抗铝毒机制研究的比较清楚(Ryan等, 1993, 1995a; Delhaize等, 1993), 本文以抗铝性不同的小麦品种为参比, 研究铝毒对秋葵种子萌发和幼苗生长的影响, 进而明确秋葵的抗铝性, 并为探明植物的耐铝毒机制提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

供试材料为秋葵(*Hibiscus moscheutos L.*)和2个不同抗铝基因型小麦(*Triticum aestivum L.*): Carazinho(抗铝型)、Egret(铝敏感型)(Ryan等, 1995b)。秋葵种子购自中国科学院植物研究所植物园。Carazinho和Egret小麦种子由澳大利亚CSIRO研究所提供。

### 1.2 种子萌发试验

1.2.1 秋葵种子萌发 将籽粒饱满的秋葵种子先用3%的次氯酸钠消毒5 min并洗净后, 移至铺有滤纸的培养皿中, 滤纸预先用不同浓度的 $\text{AlCl}_3$ 溶液浸湿。每个培养皿放30粒种子, 加2 ml处理液, 使种子保持湿润, 再盖上沾有相同处理液的滤纸, 培养皿用锡纸包裹。放置培养箱(20~25℃)中, 萌发24 h后统计发芽率(以种子露白为准)。秋葵种子萌发共设置4个处理, 分别为: 0  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  (pH 4.5), 0  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  (pH 6.0), 50  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  (pH 4.5), 500  $\mu\text{mol/L}$   $\text{AlCl}_3$  (pH 4.5), 所有的处理液和对照中均含有0.5 mmol/L的 $\text{CaCl}_2$ 。每个处理重复3次。

1.2.2 小麦种子萌发 3%的次氯酸钠分别消毒抗铝性不同的2种小麦种子5 min后, 用蒸馏水冲洗干净, 再转移到铺有滤纸的培养皿中, 每盘放15粒种子。具体实验过程同1.2.1。小麦种子萌发24 h后收样, 计算发芽率。本实验所采用的处理及重复次数同秋葵。

### 1.3 幼苗生长试验

挑选大小一致的秋葵种子, 先置于(45±5)℃的温水中浸种催芽1 h后, 放入培养箱萌发。将发芽(露白)的种子移置湿滤纸上, 于常温、黑暗下发苗。待幼苗主根长至2 cm左右时(大约发苗48 h), 将长势相同的幼苗移入250 ml的烧杯中(烧杯均用锡纸包裹), 每个烧杯移3株苗。用1/2浓度的Hoaglands营养液(pH 5.5)培养, 光照时间为12 h, 光照强度为77.4  $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 。营养液培养24 h后, 对幼苗进行铝处理。 $\text{AlCl}_3$ 浓度分别是: 0、1、10、50  $\mu\text{mol/L}$ 。所有的处理液中均含有0.5 mmol/L的 $\text{CaCl}_2$ , 并将处理液的pH调至4.5。为了排除低pH的影响, 还单独设置了pH 6.0(0.5 mmol/L的 $\text{CaCl}_2$ )作为对照。在前期的预备实验中, 我们的研究发现150  $\mu\text{mol/L}$ 的 $\text{NaCl}$ 对种子萌发和根系生长均没有影响, 因此可排除 $\text{Cl}^-$ 在 $\text{AlCl}_3$ 处理中的作用。分别在处理前和处理24 h后, 测量幼苗的主根和位于主根上的前5条侧根长。之后, 更换处理液, 继续培养, 48 h后收样并测定幼苗的侧根数、侧根长及生物量。

小麦的试验步骤及采用的处理与秋葵的相同, 每个处理重复3次。

### 1.4 数据统计与分析

主根及侧根伸长的相对百分比( $A_i$ )采用公式 $A_i = (C_i - B_i) / (C_{CK} - B_{CK}) \times 100\%$ 计算。式中:  $C$ 为处理24 h或48 h的主根或侧根长度;  $B$ 为处理前的主根或侧根长度;  $i$ 为不同处理;  $CK$ 为对照。

所有结果均采用SAS软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 秋葵和小麦种子的萌发对铝不敏感

表 1 铝对秋葵、小麦种子萌发的影响 (平均值  $\pm$  SD)Table 1 Effects of Al on seed germination of *Hibiscus moscheutos* and two wheat genotypes (means  $\pm$  SD)

处理 Treatments	种子萌发率 Seed germination rate (%)		
	秋葵	小麦 Carazinho	小麦 Egret
0 $\mu\text{mol L}$ $\text{AlCl}_3$ ( $\text{pH} = 6.0$ )	58.3 $\pm$ 10.4 (a)	96.6 $\pm$ 3.1 (a)	96.3 $\pm$ 3.1 (a)
0 $\mu\text{mol L}$ $\text{AlCl}_3$ ( $\text{pH} = 4.5$ )	57.5 $\pm$ 12.9 (a)	95.6 $\pm$ 3.8 (a)	97.8 $\pm$ 3.8 (a)
50 $\mu\text{mol L}$ $\text{AlCl}_3$ ( $\text{pH} = 4.5$ )	65.0 $\pm$ 6.4 (a)	91.1 $\pm$ 3.8 (a)	95.6 $\pm$ 3.8 (a)
500 $\mu\text{mol L}$ $\text{AlCl}_3$ ( $\text{pH} = 4.5$ )	61.7 $\pm$ 7.9 (a)	97.8 $\pm$ 3.8 (a)	95.6 $\pm$ 3.8 (a)

注：同一栏中相同字母表示差异不显著 ( $P > 0.05$ )。Note: Data with the same letter within a column are not significantly different ( $P > 0.05$ ) among the aluminium treatments.

用不同浓度的  $\text{AlCl}_3$  溶液同时对秋葵和两个不同抗铝基因型小麦品种种子处理，24 h 后测定萌发率。结果表明：(1) 在所处理的  $\text{AlCl}_3$  浓度范围内，秋葵和两个小麦品种种子各处理间的萌发率均没有明显变化(表 1)；Carazinho (抗铝型) 小麦与 Egret (铝敏感型) 小麦种子的萌发率也没有差异，均大于 90%，说明铝对这两种植物种子的萌发无影响。(2) 两种植物比较来看，秋葵种子的萌发率显著低于两个小麦品种，推测这可能与较低的 pH ( $\text{pH} = 4.5$ ) 有关。为了检验是否为低 pH 的影响，又设置了较高的 pH ( $\text{pH} = 6.0$ ) 处理为对照，结果发现， $\text{pH} 6.0$  溶液处理的秋葵、小麦种子的萌发率与  $\text{pH} 4.5$  溶液处理的结果没有差异(表 1)，表明秋葵比小麦萌发率低的主要原因来自于秋葵种子本身的特性。

## 2.2 铝对秋葵、小麦幼苗生长的影响

2.2.1 秋葵、耐铝和铝敏感小麦生物量对铝表现出不同的响应 秋葵和两个小麦品种幼苗在不同浓度的  $\text{AlCl}_3$  溶液中生长 48 h 后收获，从图 1A 可以看出，随着外界  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加 ( $1 \sim 50 \mu\text{mol/L}$ )，秋葵和 Carazinho 小麦 (抗铝型) 地上部生物量均没有显著变化，而当外界  $\text{AlCl}_3$  浓度达  $50 \mu\text{mol/L}$  时，Egret 小麦 (铝敏感型) 地上部生物量显著降低。与地上部的变化相似，秋葵根系的生物量在  $\text{AlCl}_3$  各处理间差异不显著(图 1B)； $50 \mu\text{mol/L}$  的  $\text{AlCl}_3$  却显著降低了 Carazinho 根系的生物量，而当外界  $\text{AlCl}_3$  浓度为  $10 \mu\text{mol/L}$  时，Egret 的根系生物量就开始明显下降。上述结果表明：(1) 秋葵幼苗的抗铝能力大于两个小麦品种；(2) Carazinho 幼苗的抗铝性强于 Egret。

### 2.2.2 铝对根系伸长的影响

2.2.2.1 铝抑制主根的伸长 图 2 显示了秋葵

和小麦的主根伸长随外界  $\text{AlCl}_3$  浓度的变化。从图中可以看出，低浓度的  $\text{AlCl}_3$  ( $1 \sim 10 \mu\text{mol/L}$ )

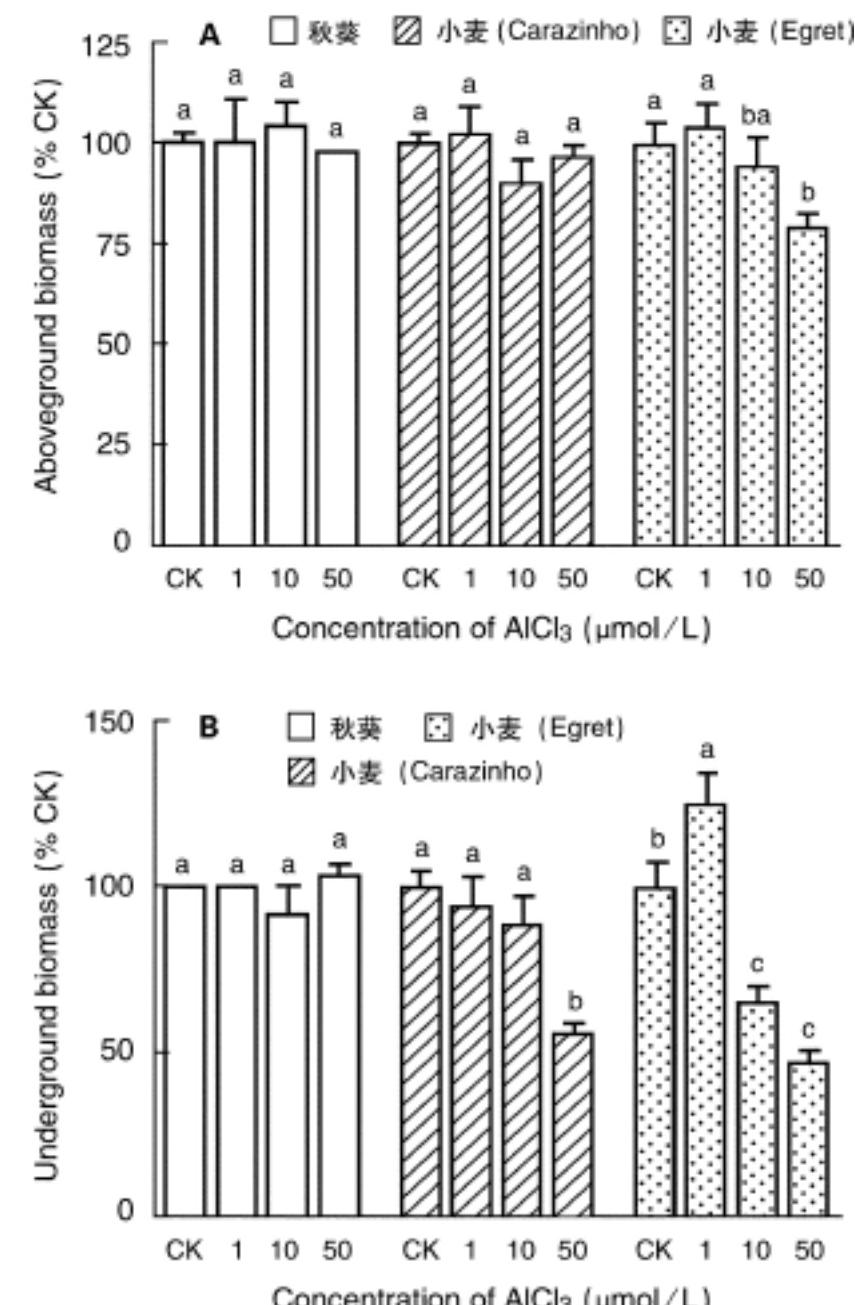


图 1 铝对秋葵和小麦生物量的影响

A. 地上部生物量；B. 地下部生物量。

(图 2~4 解释同此) 数值为 3 个重复的平均值  $\pm$  SD。不同字母表示各处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Fig. 1 Effects of Al on biomass of *H. moscheutos* and two wheat genotypes  
A. Aboveground biomass; B. Underground biomass.  
Values are means  $\pm$  SD of three replicate plants. Data with the same letter within a genotype or a plant are not significantly different ( $P > 0.05$ ).  
The same explanation was used throughout this study.

对秋葵和 Carazinho (抗铝型) 小麦主根伸长没有影响, 高浓度的  $\text{AlCl}_3$  ( $50 \mu\text{mol/L}$ ) 显著抑制主根伸长, 与对照相比, 主根伸长量分别降低了 69% 和 52%。而  $1 \mu\text{mol/L}$  的  $\text{AlCl}_3$  能显著促进 Egret (铝敏感型) 小麦主根伸长,  $10 \mu\text{mol/L}$  的  $\text{AlCl}_3$  抑制 Egret 的主根伸长, 与对照相比, 主根伸长被抑制 67.5%, 随着外界  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加, 主根伸长受抑制程度增加,  $50 \mu\text{mol/L}$  的  $\text{AlCl}_3$  使其主根伸长量降低了 81.9%。这些结果表明: 高浓度的  $\text{AlCl}_3$  对秋葵和小麦的主根伸长具明显的抑制作用; 但两种植物的主根伸长对铝胁迫的耐受性没有明显差异。为了排除溶液低 pH 的影响, 同样设置了较高的 pH 处理, 结果表明, 溶液 pH 为 4.5 时的秋葵、小麦的生物量, 主根伸长, 侧根伸长和侧根数与溶液 pH 为 6.0 时的结果没有显著差异 (数据没有显示)。

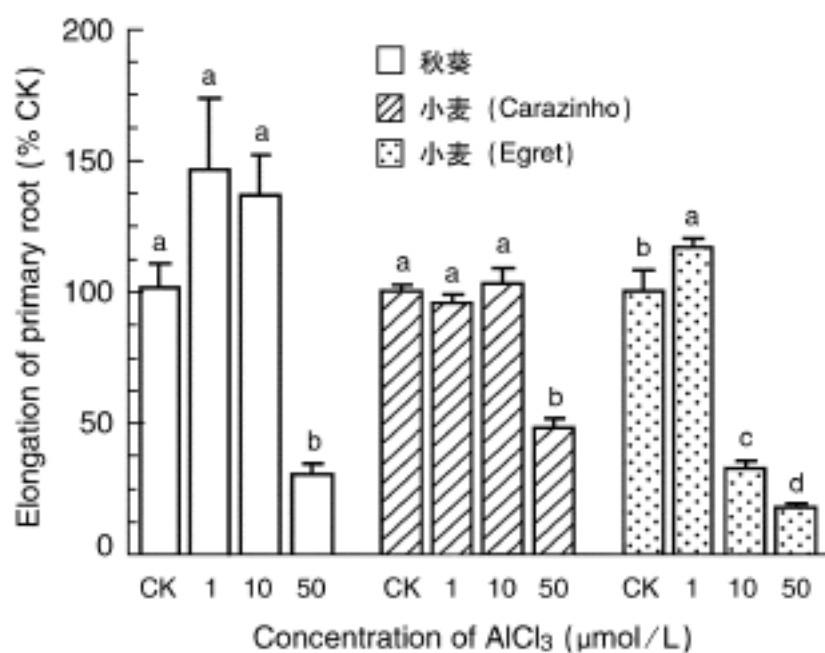


图 2 铝对秋葵和小麦主根伸长的影响 (24 h)

Fig. 2 Effects of Al on primary root elongation of *H. moscheutos* and two wheat genotypes

### 2.2.2.2 侧根伸长表现出对铝更强的敏感性

从图 3 可以看出, 低浓度  $\text{AlCl}_3$  ( $1 \mu\text{mol/L}$ ) 对秋葵侧根伸长没有影响,  $\text{AlCl}_3$  浓度达  $50 \mu\text{mol/L}$  时, 对侧根伸长产生明显的抑制作用。对两个小麦品种而言,  $1 \mu\text{mol/L}$  的  $\text{AlCl}_3$  显著抑制 Carazinho 的侧根伸长, 与对照相比抑制了 60.4%。而  $1 \mu\text{mol/L}$  的  $\text{AlCl}_3$  刺激 Egret 的侧根伸长, 并且受刺激程度比主根的反应强, 侧根的伸长量比对照增加 41%, 当外界  $\text{AlCl}_3$  浓度达  $10$ 、 $50 \mu\text{mol/L}$  时, Egret 的侧根伸长量显著降低,  $50 \mu\text{mol/L}$  的

$\text{AlCl}_3$  使 Egret 的侧根伸长量降低 91%。以上结果表明: (1) 秋葵的侧根对铝胁迫的耐受性弱于两个小麦品种; (2) 与主根相比, 两个小麦品种的侧根伸长对外界  $\text{AlCl}_3$  浓度的反应更敏感。

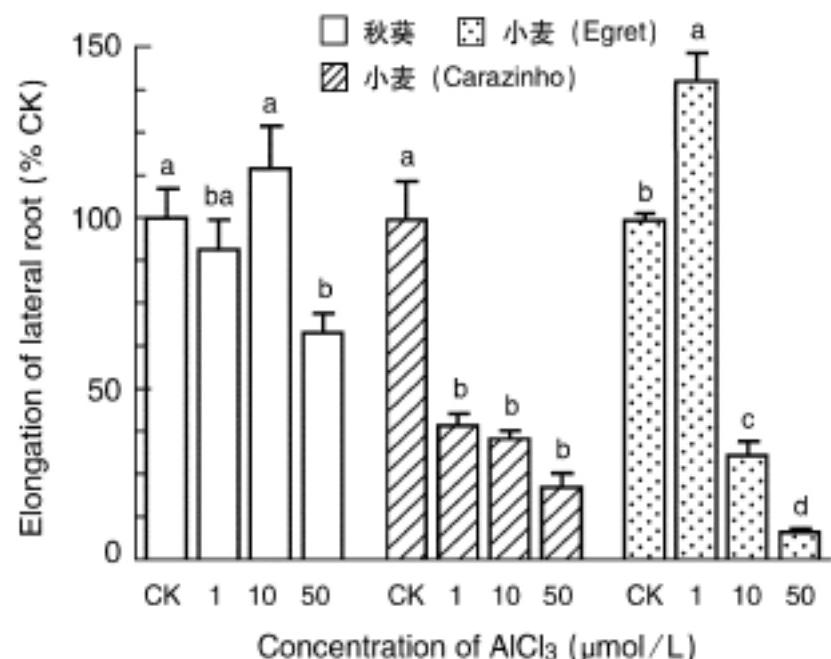


图 3 铝对秋葵和小麦侧根伸长的影响 (48 h)

Fig. 3 Effects of Al on lateral root elongation of *H. moscheutos* and two wheat genotypes

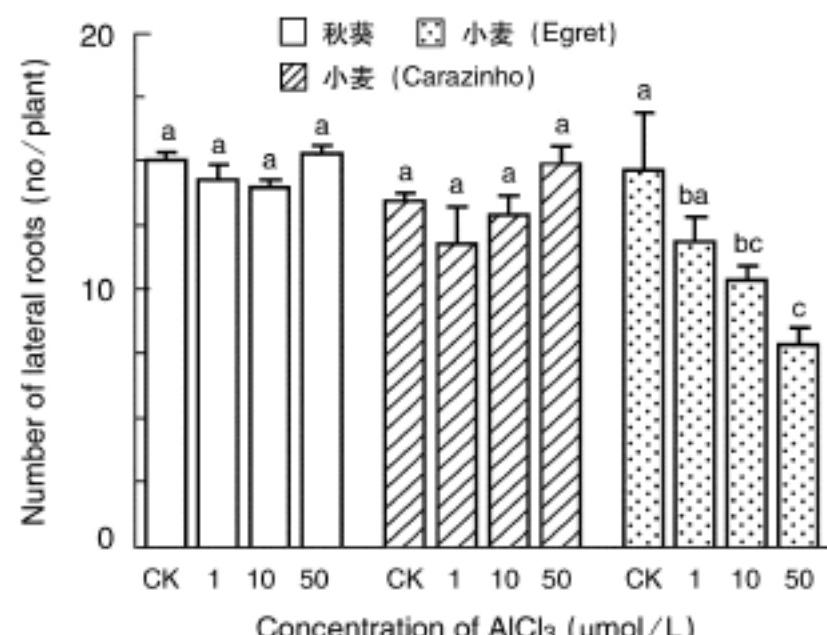


图 4 铝对秋葵和小麦侧根数目的影响 (48 h)

Fig. 4 Effects of Al on lateral root numbers of *H. moscheutos* and two wheat genotypes

图 4 显示了铝对秋葵和小麦侧根数目的影响。从图中可以看出, 随着外界  $\text{AlCl}_3$  浓度的增加, 秋葵和 Carazinho 的侧根数没有显著变化; 当  $\text{AlCl}_3$  浓度大于  $10 \mu\text{mol/L}$  时, Egret 的侧根数显著降低。Egret 小麦在  $\text{AlCl}_3$  处理时所表现出的侧根数目的减少可能是由于其主根伸长严重受抑制, 导致侧根在主根上的发生空间减少。以上结

果说明，铝胁迫处理主要影响植物的根伸长，而对侧根的发生过程影响程度较低。

### 3 讨论

土壤酸化使得可溶性铝的含量增加，进而影响植物的种子萌发和幼苗生长的一系列过程 (Matsumoto, 2000; Rengel and Zhang, 2003)。而本试验的结果显示，外界  $\text{AlCl}_3$  浓度高达  $500 \mu\text{mol/L}$  时，秋葵和两个小麦品种种子的萌发率均没有显著变化，与对云杉 (Nosko 等, 1988) 和荞麦 (李朝苏等, 2005) 的研究结果一致。但对苜蓿 (张芬琴和于金兰, 1999) 和大豆 (刘鹏等, 2003) 的研究表明，低浓度的铝促进种子萌发，高浓度铝抑制种子萌发。这表明不同物种的种子萌发对铝胁迫存在不同的反应。

关于不同物种及不同品种间幼苗的抗铝性差异已有很多报道 (Taylor and Foy, 1985; Sivaguru and Paliwal, 1993)。总体比较来看，秋葵幼苗生长的抗铝性较两个小麦品种强，秋葵可能存在与小麦不同的抗铝机制，需要通过进一步的实验研究两个物种抗铝毒差异的原因。目前在抗铝机制方面已有很多报道，因此，可以从不同的方面进行对比分析。如根际 pH 的调节能力 (Taylor and Foy, 1985)、其他养分的吸收能力 (Sivaguru and Paliwal, 1993)、根尖有机酸的释放 (Ryan 等, 1995a) 能力、胞间对  $\text{Al}^{3+}$  的沉淀和络合能力 (Barceló and Poschenrieder, 2002) 等。

铝毒的典型症状是抑制根伸长，而且根尖又是铝作用的主要部位 (Ryan 等, 1995b)。根尖包括根冠、分生区和伸长区，根冠在抗铝毒方面起重要作用 (Bennet and Breen, 1999)。与 Egret (铝敏感型) 小麦相比，秋葵的根伸长受铝胁迫的影响程度较小，这可能与秋葵的根尖结构有关。研究发现，在秋葵根尖的外圈有许多黏稠物质形成的根套，可能起到保护根尖的作用，降低铝对根尖的伤害。短时间的铝胁迫只影响根伸长 (图 2, 图 3)，而对侧根的发生影响程度较低 (图 4)，因为侧根的发生位于距离主根根尖较远的部位 (Malamy and Benfey, 1997)，而铝毒作用的主要部位是主根根尖 (Ryan 等, 1995a)，所以铝毒对侧根数目的影响较小；并且侧根的发生是中柱鞘细胞发育成侧根原基的过程，在侧根原基

未伸出表皮或刚刚伸出表皮时，根尖只形成了分生组织，还没有形成伸长区，而抑制根尖伸长区细胞的伸长是铝毒抑制根伸长的主要原因 (Sasaki 等, 1997)。

本研究的结果表明，铝对侧根和主根生长的影响不同，侧根对铝胁迫的反应比主根敏感，因为主根的发育主要受胚基因的控制 (Malamy and Benfey, 1997)，因此，与主根相比，侧根更容易受外界环境的影响。两个小麦品种的侧根伸长随外界铝浓度的变化有差异， $1 \mu\text{mol/L}$  的  $\text{AlCl}_3$  抑制 Carazinho 侧根伸长，但刺激 Egret 的侧根伸长，这表明与 Egret 相比，Carazinho 的抗铝性较强主要是针对其主根而言。关于铝对根系伸长的抑制机理，以及主根与侧根对铝胁迫反应差异的原因有待于进一步研究。

致谢 衷心感谢审稿人对本文提出的宝贵意见。

### [参 考 文 献]

- Barceló J, Poschenrieder C, 2002 . Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxificationas clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review [J] . *Environmental and Experimental Botany*, **48** : 75—92
- Bennet RJ, Breen CM, 1999 . The recovery of the roots of *Zea mays L.* from various aluminium treatments: towards elucidating the regulatory processes that underlie root growth control [J] . *Environmental and Experimental Botany*, **31** : 153—164
- Blancaflor EB, Jones DL, Gilroy S, 1998 . Alterations in the cytoskeleton accompany aluminium induced growth inhibition and morphological changes in primary roots of maize [J] . *Plant Physiology*, **118** : 159—172
- Delhaize E, Craig S, Beaton CD, et al, 1993 . Aluminium tolerance in wheat (*Triticum aestivum L.*) . I . uptake and distribution of aluminium in root apices [J] . *Plant Physiology*, **103** : 685—693
- Feng GM (冯国楣), Xu XH (徐祥浩), Zhang HD (张宏达), et al, 1984 . *Flora of China* (中国植物志) [M] . Beijing: Science Press, **49** (2) : 81
- Horst WJ, Asher CJ, Cakmak I, et al, 1992 . Short-term responses of soybean roots to aluminium [J] . *Journal of Plant Physiology*, **140** : 174—178
- Hu XH (胡小泓), 2004 . Study on okra seeds oil processing [J] . *Grain Processing* (粮食加工), **29** (6): 62—63
- Huang BQ (黄邦全), Chang L (常玲), Xue XQ (薛小桥), et al, 2001 . Effects of aluminium on growth of *Brassica napus L.* seedlings [J] . *Journal of Hubei University (Natural Science Edi-*

- tion) (湖北大学学报, 自然科学版), 23 (1): 87—89
- Li CS (李朝苏), Liu P (刘鹏), Xu GD (徐根娣), 2005 . Effect of soaking with aluminium on seedgermination and seedling physiological properties of buckwheat [A] . In: Plant Nutrition for Food Security, Human Health and Environmental Protection [M] . Beijing: Tsinghua University Press, 776—777
- Liu HT (刘厚田), Tian RS (田仁生), 1992 . Relationship between decline of a masson pine forest and aluminium activation in Nanshan, Chongqing [J] . *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 12: 97—305
- Liu P (刘鹏), Xu GD (徐根娣), Jiang XM (姜雪梅), et al, 2003 . Effects of soaking with rare-earth elements on seeds germination and seedlings growth of cucumber [J] . *Seed* (种子), (1): 30—32
- Malamy JE, Benfey PN, 1997 . Organization and cell differentiation in lateral roots of *Arabidopsis thaliana* [J] . *Development*, 124: 33—44
- Matsumoto H, 2000 . Cell biology of aluminium toxicity and tolerance in higher plants [J] . *International Review of Cytology*, 200: 1—46
- Nosko P, Brassard P, Kramer JR, et al, 1988 . The effect of aluminium on seed germination and early seedling establishment, growth, and respiration of white spruce (*Picea glauca*) [J] . *Canadian Journal of Botany Journal Canadien de Botanique*, 66: 2305—310
- Rengel Z, Zhang WH, 2003 . Role of dynamics of intracellular calcium in aluminium-toxicity syndrome [J] . *New Phytologist*, 159: 295—314
- Ryan PR, Ditomaso JM, Kochian LV, 1993 . Aluminium toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap [J] . *Journal of Experimental Botany*, 44: 437—446
- Ryan PR, Delhaize E, Randall PJ, 1995a . Malate efflux from root apices and tolerance to aluminium highly correlated in wheat [J] . *Australian Journal of Plant Physiology*, 22: 531—536
- Ryan PR, Delhaize E, Randall PJ, 1995b . Characterization of Al-stimulated efflux of malate from the apices of Al-tolerant wheat roots [J] . *Planta*, 196: 103—110
- Sasaki M, Yamamoto Y, Ma JF, et al, 1997 . Early events induced by aluminium stress in elongating cells of wheat root [J] . *Soil Science and Plant Nutrition*, 43: 1009—1014
- Sivaguru M, Paliwal K, 1993 . Differential aluminium tolerance in some tropical rice cultivars . II . Mechanism of aluminium tolerance [J] . *Journal of Plant Nutrition*, 16: 1717—1732
- Sivaguru M, Baluska F, Volkmann D, et al, 1999 . Impacts of aluminium on the cyto-skeleton of the maize root apex . Short-term effects on the distal part of the transition zone [J] . *Plant Physiology*, 119: 1073—1082
- Taylor GJ, Foy CD, 1985 . Mechanisms of aluminium tolerance in *Triticum aestivum* L . (wheat) . I . Differential pH induced by winter cultivars in nutrient solutions [J] . *Amer J Bot*, 72: 695—701
- Zhang FQ (张芬琴), Yu JL (于金兰), 1999 . Effects of aluminium treatment on the seed germination of *Medicago sativa* and its physiological characteristics of seedlings [J] . *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 8 (3): 61—65

\* \* \* \* \*

## 《科技导报》(半月刊)

### 欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告

一本有影响、有特色、有品位的高层次、高水平、高质量学术期刊

刊号 CN 11-1421 N ISSN 1000-7857 广告经营许可证: 京海工商广字第 0035 号

**科技导报:** 是中国科学技术协会学术会刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊), 主要发表国内外科学、技术和工程各学科专业领域原创性学术论文。2007 年为半月刊, 全彩印刷, 每册定价 7.00 元。

**栏目设置:** 卷首寄语、本刊专稿、专题稿件、研究论文、综述文章、研究报告、学术争鸣、实验技术、科技评论、科学家之声、科技动态、信息发布等 15 个栏目。

**办刊特色:** 处理来稿周期短, 报道成果时效强; 探究问题起点高, 研讨思路视野宽; 提出对策着眼远, 争鸣学术气氛浓; 刊载信息密度大, 排版印刷质量好。

**读者对象:** 科学、技术和工程各学科专业领域国内外一线科技工作者。

邮发代号: 2-872 (国内) M3092 (国外) 通讯地址: 北京市海淀区学院南路 86 号科技导报社 (邮编 100081)

联系电话: 010-62103282 (编辑部) 010-62175871 (办公室)

单位主页: <http://www.kjdb.org.cn> 投稿信箱: kjdbbjb@cast.org.cn 征订信箱: kjdb@cast.org.cn

户名: 科技导报社 账号: 0200001409089017271 开户银行: 工商银行百万庄支行